



УДК: 621.313.333

5.5. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОНИЗИРОВАННОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELS OF SYNCHRONIZED ASYNCHRONOUS MOTOR

Омельченко Евгений Яковлевич, профессор каф. АЭПиМ ФГБОУ ВПО МГТУ, д.т.н., 455038, Магнитогорск, пр.К.Маркса, 164/1 - 82, тел. +7 3519 296840, E-mail: momentum2@yandex.ru

Тележкин Олег Анатольевич аспирант каф. АЭПиМ ФГБОУ ВПО МГТУ, 455038, Магнитогорск, пр.К.Маркса, 121/5-90, тел. +7 950 747 6554, E-mail: olegantel@rambler.ru

Енин Сергей Сергеевич, аспирант каф. АЭПиМ ФГБОУ ВПО МГТУ, 455038, Магнитогорск, пр.К.Маркса, 119/1-11, тел. +7 903 091 3440, E-mail: enin_ss@mail.ru

Лымарь Алексей Борисович, студент каф. АЭПиМ ФГБОУ ВПО МГТУ, 455038, Магнитогорск, ул. Труда, 24/1-45, тел. +7 919 316 0198, E-mail: lyamar.alexei@mail.ru

Evgenii I. Omelchenko, Doctor of Engineering Sciences, Magnitogorsk State Technical University named after G.I.Nosov, 455038, K.Marx av. 164/1 – 82, Magnitogorsk, Russia. E-mail: momentum2@yandex.ru

Oleg A. Telezhkin, Postgraduate student, Magnitogorsk State Technical University named after G.I.Nosov, 455038, K.Marx av. 121/5-90, Magnitogorsk, Russia. E-mail: olegantel@rambler.ru

Sergei S. Enin, Postgraduate student, Magnitogorsk State Technical University named after G.I.Nosov, 455038, K.Marx av. 119/1 – 11, Magnitogorsk, Russia. E-mail: enin_ss@mail.ru

Aleksei B. Lyamar, Student, Magnitogorsk State Technical University named after G.I.Nosov, 455038, Truda st. 24/1 – 45, Magnitogorsk, Russia. E-mail: lyamar.alexei@mail.ru

Аннотация: Разработана математическая и компьютерная модели синхронизированного асинхронного двигателя, которая построена по блочному типу. Компьютерная модель состоит из блоков для расчета токов намагничивания, статора и ротора, расчета главного потока и ЭДС обмоток, расчета электромагнитного момента ротора, расчета угловой скорости и угла поворота вала двигателя. Дано математическое описание каждого блока.

Abstract: The mathematical and computer models of synchronized asynchronous motor which are built on the block type have been designed. The computer model consists of the units calculating magnetizing currents, stator and rotor current, the main electromagnetic flux and EMF of windings, electromagnetic torque of the rotor, the angular velocity and the angle of rotation of the motor shaft. The mathematical description of each block is submitted.

Ключевые слова: Синхронизированный асинхронный двигатель, математическая и компьютерная модели.

Key words: Synchronized asynchronous motor, mathematical and computer models.

Математические и компьютерные модели трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором (ADFNEW) необходимы как универсальные, законченные элементы для исследования систем электропривода «АДФ с реостатным регулированием в роторе» (АДФР), «синхронизированный асинхронный двигатель» (в фазу роторной обмотки подключается постоянное напряжение - САД), «машина двойного питания» (к фазам роторной обмотки подключается 3-фазное переменное напряжение - МДП), «асинхронно-вентильный каскад» (роторные обмотки подключаются на диодный выпрямитель с противоЭДС - АВК).

Новизна математической модели:

- модель комбинированного типа, расчеты переменных проводятся как в 3-фазных системах координат статорной и роторной обмоток [2], так и в двухфазной вращающейся системе;

- основное уравнение, положенное в работу модели, строится на **векторной сумме токов**, входящих в Т-образную схему замещения

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_m + \vec{I}_2 + \vec{I}_c. \quad (1)$$

Чтобы воспользоваться уравнением (1), необходимо знать проекции всех используемых векторов во вращающейся системе координат.

Компьютерная модель ADFNEW (рис. 1) разработана в программе MATLAB и построена по блочному принципу.

Фазные токи статора I_{li} зависят от питающего напряжения U_{li} , противо-ЭДС E_{li} , наводимых в обмотках, и параметров статорной обмотки. Принимается, что параметры трех обмоток статора одинаковы и фазные токи в операторном виде в трехфазной неподвижной системе координат **ABC** могут быть рассчитаны по формулам

$$\left. \begin{aligned} I_{li}(p) &= (U_{li}(p) - E_{li}(p) - U_{10}) \frac{1/R_l}{1 + T_l p}, \\ I_{1A}(p) + I_{1B}(p) + I_{1C}(p) &= 0. \end{aligned} \right\} (2)$$

где: i – индекс фазы статора, принимает значения А, В, С; $T_l = L_l/R_l$ – электромагнитная постоянная времени статорной обмотки, с; L_l – индуктивность потоков рассеивания, Гн; U_{10} – напряжение смещения нейтральной точки обмотки по отношению к нейтрали сети, В.

Расчет трех фазных токов статора **IS** в соответствии с формулами (2) выполняется в

блоке **1/Z1**. На вход блока поступают трехмерный вектор питающего напряжения **US** и трехмерный вектор противоЭДС **ES**.

Фазные токи ротора I_{2j} зависят от ЭДС E_{2j} , наводимых в обмотках, напряжения U_{2j} , питающего ротор, и параметров роторной обмотки, причем сопротивления ротора R_{2j} могут быть заданы разными. Поэтому фазные токи ротора в операторном виде в трехфазной системе координат **abc**, вращающейся со скоростью скольжения, могут быть рассчитаны по формулам

$$I_{2j}(p) = (E_{2j}(p) - U_{2j}(p) - U_{20} - I_{2j}(p)R_{2j}) \frac{1}{L_2 p}, (3)$$

$$I_{2a}(p) + I_{2b}(p) + I_{2c}(p) = 0.$$

где: j – индекс фазы ротора, принимает значения а, b, с; L_2 – индуктивность потоков рассеивания роторной обмотки, Гн; U_{20} – напряжение смещения нейтральной точки обмотки по отношению к нейтрали внешней цепи, В.

Расчет трех фазных токов ротора **IR** в соответствии с формулами (3) выполняется в блоке **1/Z2**. На вход блока поступают трехмерные векторы **ER**, **UR** и трехмерный вектор относительного добавочного сопротивления **rd3**.

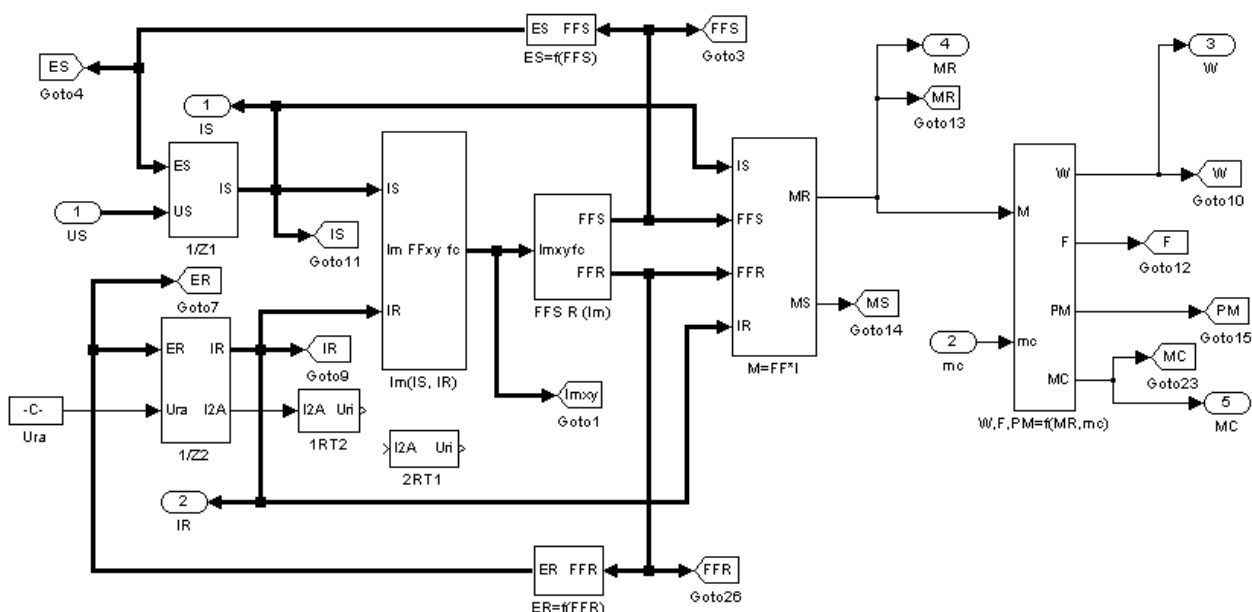


Рис. 1. Структурная схема модели ADFNE

В системе с реостатным регулированием $U_{2j} = 0$, $R_{2j} = R_2 + R_{dj}$.

В системе МДП $R_{dj} = 0$. Напряжение U_{2j} задается трехфазными векторами заданной амплитуды и частоты.

В системе синхронизированного асинхронного двигателя добавочные сопротивления в роторе $R_{dj} = 0$, а напряжения U_{2j} при синхронизации равны: $U_{2a} = U_d$; $U_{2b} = U_{2c} = 0$.

Для расчета тока намагничивания проекции трехмерного вектора тока статора последовательно пересчитываются по известным формулам из трехфазной неподвижной системы координат **ABC** в двухфазную неподвижную **αβ**, а затем преобразовываются в двухфазную вращающуюся систему координат **xy** [3]. Проекция трехмерного вектора тока ротора надо последовательно пересчитать из трехфазной вращающейся системы координат **abc** в двухфазную вращающуюся систему **dq**, а затем преобразовать в двухфазную вращающуюся систему координат **xy**.

Эти преобразования выполняются в программном блоке **Im(IS, IR)**. Далее, в соответствии с уравнением (1), выполняется расчет проекций двухмерного вектора тока намагничивания и его модуль

$$\left. \begin{aligned} I_{mx} &= I_{sx} - I_{rx} - I_{cx}, \\ I_{my} &= I_{sy} - I_{ry} - I_{cy}, \\ I_m &= \sqrt{I_{mx}^2 + I_{my}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Расчет составляющих двумерного вектора главного потока может быть выполнен по формулам

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{mx} &= L_m \cdot I_{mx}, \\ \Psi_{my} &= L_m \cdot I_{my}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для расчета ЭДС последовательно выполняются следующие операции:

- для неподвижной трехфазной системы статорной обмотки необходимо преобразовать двухмерный вектор главного потока из вращающейся системы координат **xy** в неподвижную **αβ**, далее пересчитать в трехмерную неподвижную систему **ABC** и после этого по трехмерным составляющим потока рассчитать трехмерные ЭДС статорной обмотки;

- для вращающейся трехфазной системы роторной обмотки необходимо преобразовать двухмерный вектор главного потока из вращающейся системы координат **xy** во вращающуюся **dq**, далее пересчитать в трехмерную вращающуюся систему **abc** и после этого по трехмерным составляющим потока рассчитать трехмерные ЭДС роторной обмотки.

В программном блоке **FFS R(Im)** пересчитывается двухмерный вектор главного потока из вращающейся системы координат в трехмерный вектор статора в неподвижной системе координат **ABC** и в трехмерный вектор ротора во вращающейся системе координат **abc**.

Расчеты трехмерных векторов ЭДС статорной и роторной обмоток выполняются в программных блоках **ES=f(FFS)** и **ER=f(FFR)**, соответственно, по уравнениям

$$\left. \begin{aligned} E_{si}(p) &= K_{OB1} \Psi_{si}(p) \frac{p}{1 + t_0 p}, \\ E_{rj}(p) &= K_{OB2} \Psi_{rj}(p) \frac{p}{1 + t_0 p}. \end{aligned} \right\}$$

Расчет электромагнитного момента в модели выполняется в блоке **M=FF*I** по формуле [4]

$$M_r = p_{II} (I_{ra}(\Psi_{rb} - \Psi_{rc}) + I_{rb}(\Psi_{rc} - \Psi_{ra}) + I_{rc}(\Psi_{ra} - \Psi_{rb})) / \sqrt{3}$$

на основании информации о трехмерных векторах главного потока и тока роторной обмотки.

Программный блок **W,F,PM=f(MR,mc)** обеспечивает расчет угловой скорости вращения и механический угол поворота роторной обмотки по уравнениям

$$\omega(p) = (M_r(p) - M_c(\omega)) \frac{1}{J_{\Sigma} p} + \omega(0),$$

$$\Theta_r(p) = \omega(p) \frac{1}{p} + \Theta_r(0).$$

где: J_{Σ} – суммарный момент инерции электропривода, кг*м²; $M_c(\omega)$ – момент сопротивления механизма, Нм.

На рис. 2 приведены переходные процессы синхронизации асинхронного двигателя МТФ211-6 (9 кВт, 915 об/мин). Асинхронный пуск выполняется от преобразователя частоты со скалярным регулированием за 1 с. Синхронизация двигателя начинается при $t = 1,0$ с подачи постоянного напряжения в фазу а роторной обмотки. Обмотки b и c соединены параллельно. Процесс синхронизации сопровождается

колебательным переходным процессом момента двигателя, зависящим от момента подачи напряжения в фазу а. На компьютерной модели проведено исследование влияния момента синхронизации на качество переходного процесса момента двигателя.

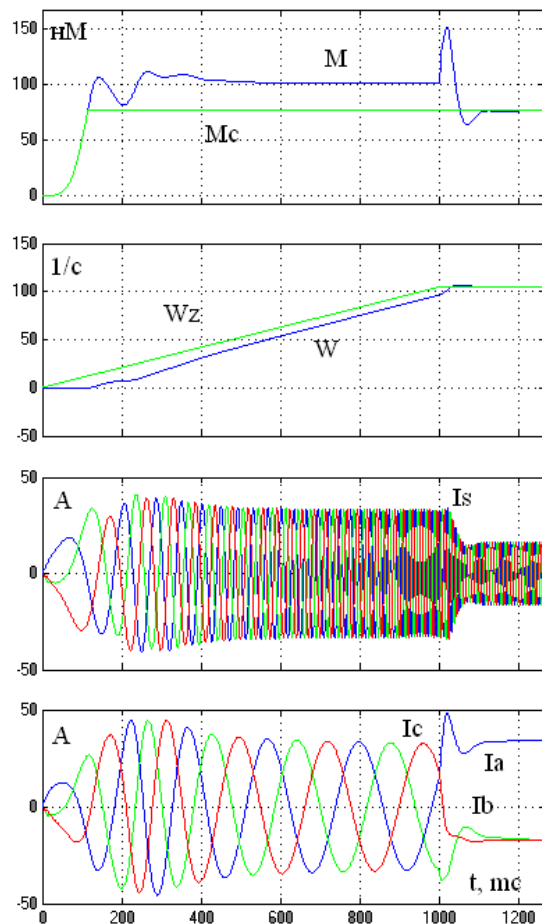


Рис. 2. Переходные процессы пуска и синхронизации

По результатам компьютерного моделирования процесса синхронизации асинхронного двигателя можно сделать вывод, что наилучший момент подачи постоянного напряжения, когда ток ротора фазы а увеличивается с 0 до максимума.

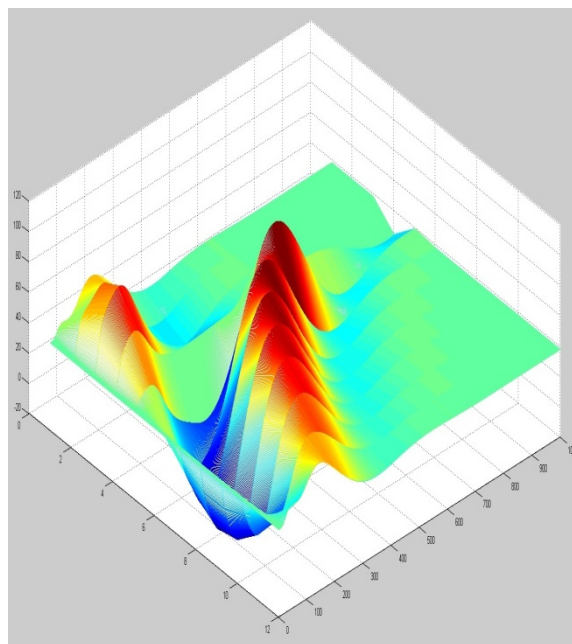


Рис. 3. Переходные процессы момента двигателя в формате 3D

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Магнитодвижущие силы трехфазных обмоток асинхронных машин / А.С.Сарваров, Е.Я.Омельченко // Электротехника -2013, № 1, С.31-35.
2. Электромеханические свойства асинхронных двигателей / И.А.Селиванов, Е.Я.Омельченко // Вестник. Магнитогорск: МГТУ.- 2011.- №3(35). -С. 35-38.
3. Омельченко Е.Я. Динамические математические модели асинхронных двигателей: монография / Омельченко Е.Я.: ФГБОУ ВПО «Магнитогорск. гос. техн. ун-т». – Магнитогорск, 2012. 157 с. – Деп. в ВИНТИ 22.03.2012, № 104-B2012.
4. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654с.